

MOGUĆNOST RJEŠAVANJA PROBLEMATIKE OTPADNOG TONERSKOG PRAHA U VODENIM SUSTAVIMA

A POSSIBILITY OF WASTE POWDER TONER TREATMENT IN AQUEOUS SYSTEMS

Nikola Kaniški¹, Ivana Grčić², Dinko Vujević^{1*}

¹ Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Zavod za inženjerstvo okoliša, Hallerova aleja 7, 42000 Varaždin, HRVATSKA

² Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zavod za polimerno inženjerstvo i organsku kemijsku tehnologiju, Marulićev trg 19, 10 000 Zagreb, HRVATSKA

*E-mail adresa osobe za kontakt / e-mail of corresponding author: dinko.vujevic@gfv.hr

Sažetak : Organska sintetska bojila i pigmenti upotrebljavaju se u različitim aspektima ljudske djelatnosti kao što su npr. toneri i tinte u pisačima svih vrsta. Uslijed neadekvatnog zbrinjavanja tonera i tinti nakon njihove upotrebe moguće je onečišćenje okoliša prvenstveno tla te površinskih i podzemnih voda. Ukoliko otpadni toner i tinta dospiju u okoliš, posebno prirodne vodotoke, zbog svoje obojenosti narušavaju njegovu estetiku, a sadržaj različitih štetnih tvari, naročito teško razgradljivih i toksičnih organskih sintetskih bojila i pigmenata predstavlja potencijalnu opasnost za živi svijet. U ovom radu istraživana je primjena relativno jeftine metode koagulacije/flokulacije za uklanjanje pigmenata iz modelne otpadne vode pripremljene suspendiranjem praha istrošenog tonera u vodi. Kao koagulant upotrijebljeni su aluminijev(III) sulfat i željezov(III) klorid. Optimirane su njihove koncentracije te pH vrijednost sustava. Na temelju pokazatelja kakvoće vode i ekonomskih pokazatelja uspoređena je njihova učinkovitost.

Glavne riječi: organska sintetska bojila i pigmenti, toneri i tinte, otpadna voda, koagulacija/flokulacija.

Abstract: Organic synthetic dyes and pigments are used in different aspects of human activities as for example in toners and inks for all kinds of printers. Due to inadequate toner and ink disposal after they have been used, environmental pollution can primarily occur in soil, surface and underground waters. In the case that such waste is disposed into the environment without prior adequate treatment, it could pose a hazard for the environment due to the content of non-biodegradable and toxic chemical compounds. In this study the application of relatively cheap coagulation/flocculation method for removal of pigments from wastewater which is prepared by dispersion of dust of used toner in water is examined. As coagulants aluminium(III) sulphate and iron(III) chloride were used. Their concentrations and pH values were optimised. Their efficiency was compared on the basis of ecological and economical indicators.

Keywords: organic synthetic dyes and pigments, toners and inks, wastewater, coagulation/flocculation.

Received: 08.10.2015 / Accepted: 01.12.2015
Published online: 14.12.2015

Znanstveni rad / Scientific paper

1. UVOD

Sve veće količine otpada koje opterećuju mehanizme prirodnog pročišćavanja uzrokovane su povećanjem svjetske populacije kao i rastuće proizvodnje različitih proizvoda koji omogućavaju sve moderniji način života (Vujević 2007).

Pisači se koriste u najrazličitijim aspektima ljudskog djelovanja te je njihova upotreba neizostavna. U slučaju neadekvatnog zbrinjavanja otpadnog tonera moguće je narušavanje kvalitete okoliša. Naime, sastavni dio tonera koji svakodnevno koriste milijuni ljudi širom svijeta su organska sintetska bojila i pigmenti. Prah iz tonera koji je dospio u okoliš ispiranjem oborinama, može dospjeti u tlo i vodonosne sustave. S obzirom da sadrži ostatke organskih sintetskih bojila i pigmenata, zbog obojenosti tih kemikalija moguće je narušavanje estetike okoliša. Nadalje, zbog kompleksne i postojeće strukture mogući su i drugi štetni utjecaji na okoliš kao i na zdravlje ljudi. U skladu s načelima čistije proizvodnje i održivog razvitka, a u cilju zaštite okoliša, uklanjanje

organskih bojila i pigmenata, problem je od velike važnosti. Stroga zakonska regulativa nameće zbrinjavanje te vrste onečišćivala na način da naglašava i propisuje potrebu pronalaska optimalnih metoda smanjenja tj. obrade otpadnih tokova koje sadrže te tvari (Vujević 2007).

2. OPĆI DIO

2.1. Bojila i pigmenti

Obojenost je jedan od najvidljivijih indikatora onečišćenja vode, a sama bojila i pigmenti, odnosno produkti njihove razgradnje mogu imati štetan učinak na žive organizme i ljudsko zdravlje (Ramalho et al. 2002). Prisutnost već i vrlo niskih koncentracija bojila i pigmenata u prijamnicima je nepoželjna jer narušava njihovu estetiku. Osim toga takve vode vrlo često sadrže i druge neobojene organske spojeve koji mogu imati štetan

utjecaj na okoliš. Osnovna podjela svih bojila je podjela prema podrijetlu. Prema toj podjeli bojila se dijele na prirodna i sintetska. (Gudelj *et al.* 2011) Pigment je vrlo fini prah koji se u tinti nalazi u obliku suspenzije. Danas na tržištu postoji veliki broj različitih vrsta pigmenata koji imaju čitav niz primjena. Prema porijeklu pigmenti mogu biti prirodni i sintetski, a prema kemijskom sastavu anorganski i organski. U anorganske pigmente spadaju titanov(IV) oksid, antimonov(III) oksid, cinkov(II) oksid, kalcijev karbonat te pigmenti na bazi silicija. Organski pigmenti prema strukturi mogu biti: monoazo i diazo pigmenti, pigmenti na bazi kiselih i bazičnih bojila, ftalocijaninski i ne-ftalocijaninski pigmenti te pigmenti na bazi kvinakridona. Pigmenti se koriste za bojanje plastike, sintetskih vlakana te proizvodnju površinskih premaza, tinti i tonera. Također imaju široku primjenu u svim aspektima tiska (Kolorjet Chemicals Pvt. Ltd. 2015).

3. NEGATIVAN UTJECAJ NA ZDRAVLJE

Razmišljate li ikada o utjecaju na okoliš koji ostavljate svaki puta kada odaberete opciju „print“? Većina ljudi razmišlja o količini papira koja se koristi kod ispisa, ali vjerojatno samo mali broj razmišlja o tome od čega se sastoji tinta u toneru u printeru. Prema podacima iz literature samo u Sjedinjenim Američkim Državama se svake godine više od 350 milijuna komada tinte i tonera nepropisno odbaci u okoliš (Dimples 2015). Ova je brojka svake godine sve veća. S obzirom da toneri i tinte pored ostalih sastojaka štetnih za okoliš i ljudsko zdravlje, sadrže i smole, procjenjuje se da je za njihovu razgradnju na odlagalištima potrebno 1000 godina. Nadalje, pigmenti i bojila, u obliku sitnih čestica tj. finog praha, mogu ostati suspendirani u zraku neko vrijeme te se smatra da se učinci na zdravlje manifestiraju dodatnom iritacijom ljudi koji već imaju respiratorne probleme kao što su astma i bronhitis (Gudelj 2011). Zbog neadekvatnog zbrinjavanja tinti i tonera isti vrlo lako mogu dospjeti u tlo te površinske i podzemne vode. S obzirom da sadrže postojane anorganske i organske spojeve mogu štetno utjecati na biljni i životinjski svijet te ugroziti zdravlje čovjeka. Prema našem najboljem saznanju, u literaturi nisu opisani primjeri rješavanja problematike otpadnih tonera u vodi. S druge strane, s obzirom da otpadni toner, pored ostalog, sadrži pigmente organskog porijekla te je u literaturi opisan čitav niz primjera uklanjanja takvih spojeva iz otpadnih voda pomoću koagulacije/flokulacije, i u ovom radu je za uklanjanje te vrste spojeva primijenjena ova metoda (Fendri *et al.* 2013; Aboulhassan *et al.* 2014).

4. KOAGULACIJA/FLOKULACIJA

Koagulacija je općenito svaki proces u kojem iz manjih čestica nastanu veće. To je proces u kojem koloidne čestice otopljene u nekom kapljevitom sustavu gube svoju stabilnost i oblikuju nakupine koje sadrže više čestica. Nakupine koloidnih čestica koje su nastale koagulacijom nazivaju se flokule pa je i sam proces dobio naziv flokulacija. Flokulacija je proces međusobnog privlačenja slabim silama ili povezivanja u flokule preko

adsorbiranih molekula flokulanta makromolekulske prirode (Vujević 2007; Faust & Aly 1999).

U koagulaciji, kao reagensi, široku upotrebu imaju mineralne soli polivalentnih kationa, a što je valencija iona viša, proces flokulacije je učinkovitiji. Ioni željeza i aluminijska u upotrebi su još od davnih vremena, kada su se kao koagulant upotrebljavali glinica $Al_2(SO_4)_3$ i gašeno vapno $Ca(OH)_2$, samo ili u kombinaciji sa željezovim solima $Fe_2(SO_4)_3$ ili $FeCl_3$. U novije vrijeme, kao koagulant sve se više upotrebljavaju prirodni i sintetski polimeri velike molekulske mase, jer se upotrebom velikih količina aluminijskih i željezovih koagulanata stvara mnogo mulja koji otežava odjeljivanje faza (Faust & Aly 1999).

5. EKSPERIMENTALNI DIO

5.1. Svrha rada

Svrha ovog rada je istraživanje mogućnosti obrade otpadne vode nastale onečišćenjem otpadnim prahom tonera. Kao potencijalno učinkoviti proces obrade ovog tipa otpadne vode studirana je primjena koagulacije/flokulacije u laboratorijskom mjerilu.

Pripremljena je modelna otpadna voda koja je sadržavala prah jednog istrošenog komercijalnog tonera koji se naveliko koristi u laserskim pisačima svih vrsta, a čiji je sastav prikazan Tablicom 1. Izmjereni su početni pokazatelji modelne otpadne vode (pH, NTU i TOC) te su nakon toga ispitivane učinkovitosti $Al_2(SO_4)_3$ i $FeCl_3$ kao koagulanata za uklanjanje onečišćenja u procesu koagulacije/flokulacije. Također je istraživao optimalni pH sustava kod kojeg dolazi do procesa koagulacije/flokulacije. Kvaliteta obrađene otpadne vode procijenjena je određivanjem stupnja uklonjenog zamućenja (NTU) turbidimetrom 2100 P (HACH) i sadržaja ukupnog organskog ugljika (TOC) pomoću TOC-V_{CPN}, Total organic carbon analyser-a (Shimadzu). Analize su provedene u Laboratoriju za geokemiju okoliša, Geotehničkog fakulteta, Sveučilišta u Zagrebu.

Tablica 1. Sastav praha iz tonera

Naziv	Cyan	Yellow	Black	Ma-genta
	%	%	%	%
Poliesterska smola	80-90	80-90	80-90	80-90
Stiren akrilatni kopolimer	1-5	1-5	5-10	
Vosak	1-5	1-5	1-5	1-5
Organski pigment	1-5	1-5	1-5	1-5
SiO ₂	1-5	1-5	1-5	1-5

5.2. Kemikalije i instrumenti

Kemikalije koje su korištene prilikom laboratorijskog ispitivanja navedene su u Tablici 2. Sve kemikalije bile su analitičkog stupnja čistoće *p.a.* i nabavljene od tvrtke Kemika, Zagreb.

Tablica 2. Kemikalije korištene u laboratoriju

Kemikalija	Molekulska formula	M g/mol
Aluminijev(III) sulfat	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \times 18\text{H}_2\text{O}$	666,42
Željezov(III) klorid	$\text{FeCl}_3 \times 6\text{H}_2\text{O}$	270,33
Natrijev hidroksid (15 %)	NaOH	40,00
Sumporna kiselina	H_2SO_4	98,08
Prah tonera		

Aluminijev(III) sulfat i željezov(III) klorid korišteni su kao koagulanti. Priređene su otopine određenih koncentracija kojima se podešavala pH vrijednost otopinama sumporne kiseline koncentracije 0,42 mol/L odnosno natrijeva hidroksida koncentracije 3,75 mol/L.

Modelna otpadna voda pripremljena je suspendiranjem 1,5 g praha komercijalne smjese tonera za laserske pisače, proizvođača Kyocera Mita Corporation, Osaka, Japan u 1 L destilirane vode.

Detaljniji sastav praha iz tonera koji je korišten za pripremu modelne otpadne vode prikazan je u Tablici 1.

Prilikom izvođenja eksperimentalnog dijela ovog rada pored uređaja navedenih u poglavlju 5.1., korišteni su još:

- Miješalica IKA® KS 130 BASIC
- pH vrijednost mjerena je Univerzalnim indikator papirom (1-14)
- Laboratorijska vaga KERN ABJ 220-4M

5.3. Pokazatelji kakvoće vode

5.3.1. Određivanje zamućenja (turbiditet)

Mjerenje zamućenja provedeno je turbidimetrom, na temelju usporedbe jačine dispergirane svjetlosti pri prolasku kroz uzorak, s jačinom dispergirane svjetlosti pri prolasku kroz standardnu suspenziju (formazinov polimer), a koncentracija osnovne suspenzije je 40 NTU. Mutnoća se izražava u nefelometrijskim jedinicama NTU (Nephelometric Turbidity Unit), 1 NTU = 0,13 mgSiO₂/L (Tepeš 2011).

5.3.2. Određivanje sadržaja ukupnog organskog ugljika

Standardna metoda mjerenja ukupnog organskog ugljika temelji se na oksidaciji organskih tvari otopljenih u vodi do ugljikovog dioksida i vode pri 680 °C. Ugljikov dioksid se kvantitativno određuje metodom neraspršujuće infracrvene detekcije pri čemu se najprije odredi TC (Total Carbon) vrijednost, a potom IC (Inorganic Carbon) vrijednost. Količina ukupnog organskog ugljika (TOC) jednaka je razlici vrijednosti ukupne količine ugljika i anorganskog ugljika u uzorku.

6. EKONOMSKA ANALIZA

Ekonomsku analizu je moguće provesti pomoću jednostavnog izraza (1) koji se uobičajeno koristi kod izračunavanja isplativosti procesa pri obradi otpada i zaštiti okoliša (Rubin & Davidson 2001).

$$I = \frac{T}{O} \quad (1)$$

gdje je: I - isplativost, kn/%

T - trošak, kn

O - postotak uklonjenog onečišćivala, %

Potrebno je dobiti najmanji mogući iznos omjera troška i postotka uklonjenog onečišćivala da bi za provedeni proces bilo utrošeno najmanje novca za uklanjanje emisija onečišćivala. Kao osnova za izračunavanje troška, u obzir su uzete trenutne cijene korištenih kemikalija prikazanih Tablicom 3. (Sigma-Aldrich 2015) te cijena električne energije u iznosu od 0,85 kn/kWh (HEP, 2015). Električna energija utrošena je na rad miješalice IKA® KS 130 basic snage 45 W. Interval rada miješalice bio je 1 minuta u režimu brzog miješanja (320 rpm) te 14 minuta u režimu sporog miješanja (160 rpm).

Tablica 3. Cijene korištenih kemikalija

KEMIKALIJA	CIJENA, kn/kg
$\text{FeCl}_3 \times 6\text{H}_2\text{O}$	864,68
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \times 18\text{H}_2\text{O}$	603,38
NaOH	294
H_2SO_4	232,79

7. REZULTATI I RASPRAVA

7.1. Optimiranje procesa koagulacije/flokulacije

U svrhu optimiranja procesa koagulacije/flokulacije zbog određivanja najučinkovitijeg koagulant, njegove količine i pH vrijednosti uz korištenje željezova(III) klorida i aluminijeva(III) sulfata za obradu otpadne vode provedena je serija eksperimenata („jar testovi“), u laboratorijskim čašama nazivnog volumena 100 mL s reakcij-

skim volumenom modelne otpadne vode 50 mL, pri sobnoj temperaturi, uz primjenu brzog i sporog miješanja na mehaničkoj miješalici. Varirane su koncentracije koagulanata i pH vrijednosti s ciljem određivanja optimalnih vrijednosti pri kojima će se postići jasno odjeljivanje faza (talog-supernatant) odnosno uvjeti pri kojima će biti ostvaren maksimalni stupanj uklanjanja zamućenja (NTU) i sadržaja ukupnog organskog ugljika (TOC) uz upotrebu minimalne količine koagulanta (Renault *et al.* 2009; Woodard 2001). U Tablici 4 dane su početne vrijednosti pH, TOC-a i NTU za modelnu otpadnu vodu.

Tablica 4. Početni pokazatelji onečišćenja

Modelna otopina tonera $\gamma=1,5$ g/L	Mjereni pokazatelji		
	pH	TOC, mg/L	NTU
	5,5	16,01	>1000

7.1.1. Optimiranje procesa

koagulacije/flokulacije s aluminijevim(III) sulfatom kao koagulantom

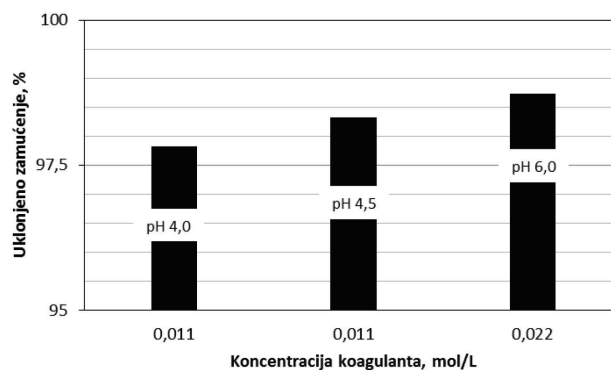
Prvi dio eksperimenata s aluminijevim(III) sulfatom kao koagulantom proveden je pri koncentraciji koagulanata od 0,011, 0,022 i 0,044 mol/L. Eksperimenti su provedeni pri pH vrijednostima 3; 4; 4,5; i 6. pH-vrijednost sustava podešavana je dodatkom nekoliko kapi otopine sumporne kiseline koncentracije 0,42 mol/L odnosno otopine natrijevog hidroksida koncentracije 3,75 mol/L.

Nakon što su uzorci odstajali do idućeg radnog dana, kod nekih je došlo do jasnog odjeljivanja faza kao npr. u eksperimentu koji je proveden uz koncentraciju aluminijevog(III) sulfata od 0,011 mol/L i pH 4,5-vrijednosti 4,5. (Slika 1).



Slika 1. Uzorak obrađen aluminijevim(III) sulfatom koncentracije 0,011 mol/L pri pH=4,5

Iz uzoraka u kojima je došlo do odvajanja faza (talog-supernatant) pipetom je uzet dio supernatanta koji je zatim podvrgnut određivanju zamućenja. Ovi rezultati prikazani su grafički Slikom 2. Iz prikazanih rezultata, vidljivo je da je najveći stupanj uklonjenog zamućenja u iznosu od 98,7 % postignut pri koncentraciji aluminijevog(III) sulfata od 0,022 mol/L i pH=6.



Slika 2. Stupanj uklonjenog zamućenja upotrebom aluminijevog(III) sulfata

Uzorci u kojima su postignuti maksimalni stupnjevi uklonjenog zamućenja (Slika 2) podvrgnuti su daljnjoj analizi u svrhu određivanja sadržaja ukupnog organskog ugljika. Rezultati tih analiza prikazani su u Tablici 5.

Tablica 5. Stupanj uklonjenosti ukupnog organskog ugljika aluminijevim(III) sulfatom

	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \times 18\text{H}_2\text{O}$		
	0,011		0,022
c, mol/dm ³			
pH	4	4,5	6
Uklonjeno TOC, %	77,53	76,34	77,13

Iz ovih je rezultata vidljivo da je u sva tri slučaja postignut vrlo sličan stupanj uklanjanja sadržaja ukupnog organskog ugljika (76-77 %). Na temelju dobivenih rezultata, kao optimalni uvjet procesa koagulacije/flokulacije uz upotrebu aluminijevog(III) sulfata odabrana je koncentracija koagulanata od 0,011 mol/L i pH=4 jer je to najmanja koncentracija pri kojoj je postignut najviši stupanj uklanjanja organske tvari.

7.1.2. Optimiranje procesa koagulacije/flokulacije sa željezovim(III) kloridom kao koagulantom

Idući set eksperimenata proveden je u svrhu određivanja optimalne koncentracije željezovog(III) klorida kao koagulanta. Pri tome su ispitivane koncentracije koagulanata iznosile 0,011, 0,022 i 0,044 mol/L. Eksperimenti su provedeni pri pH vrijednostima 2; 2,5; 3; i 5. pH-vrijednost sustava podešavana je dodatkom nekoliko kapi

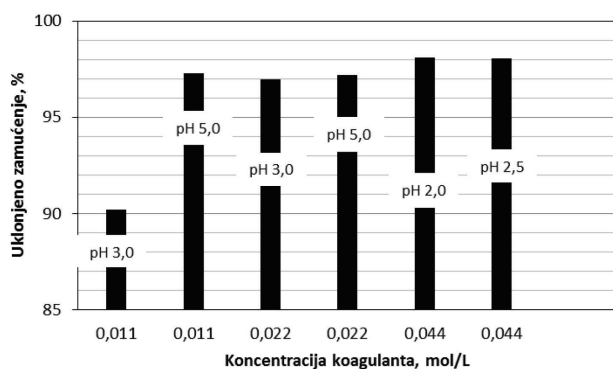
otopine sumporne kiseline koncentracije 0,42 mol/L odnosno otopine natrijevog hidroksida koncentracije 3,75 mol/L.

Nakon što su uzorci odstajali do idućeg radnog dana, kod nekih je došlo do jasnog odjeljivanja faza kao npr. u eksperimentu koji je proveden uz koncentraciju željezovog(III) klorida od 0,044 mol/L i pH=2 (Slika 3).



Slika 3. Uzorak obrađen željezovim(III) kloridom koncentracije 0,044 mol/L pri pH=2

Iz uzoraka u kojima je došlo do odvajanja faza (talog-supernatant) pipetom je uzet dio supernatanta koji je zatim podvrgnut određivanju zamućenja. Dobiveni rezultati prikazani su grafički Slikom 4. Iz rezultata je vidljivo da je najveći stupanj uklonjenog zamućenja u iznosu od 98,7 % postignut pri koncentraciji željezovog(III) klorida od 0,044 mol/L i pH=2.



Slika 4. Stupanj uklonjenog zamućenja željezovim(III) kloridom

Uzorci u kojima su postignuti maksimalni stupnjevi uklonjenog zamućenja (Slika 4) podvrgnuti su daljnjoj

analizi u svrhu određivanja sadržaja ukupnog organskog ugljika. Rezultati su prikazani u Tablici 6.

Tablica 6. Stupanj uklonjenosti ukupnog organskog ugljika željezovim(III) kloridom

	FeCl ₃ ×6H ₂ O	
c, mol/L	0,011	0,044
pH	3	2
Uklonjeno TOC, %	34,04	62,24

Na temelju dobivenih rezultata (Tablica 6), kao optimalni uvjet procesa koagulacije/flokulacije uz upotrebu željezovog(III) klorida odabrana je koncentracija koagulantna od 0,044 mol/L i pH=2 jer je to najmanja koncentracija pri kojoj je postignut najviši stupanj uklanjanja organske tvari.

8. EKONOMSKA ANALIZA PROCESA KOAGULACIJE/FLOKULACIJE

U okviru ovog rada razmatrana je ekonomska isplativost obrade modelne otpadne vode koja je sadržavala otpadni toner procesom koagulacije/flokulacije prema izrazu (1). Pri tome su u obzir uzete cijene korištenih kemikalija (Tablica 3) i cijene električne energije koja je utrošena prilikom procesa miješanja pripremljenih otopina (HEP 2015). Rezultati ekonomske analize prikazani su u Tablici 7.

Tablica 7. Ekonomska isplativost optimalnih procesa

Proces	Isplativost, kn/%
Koagulacija/flokulacija modelne otpadne vode s FeCl ₃ ×6H ₂ O	0,122
Koagulacija/flokulacija modelne otpadne vode s Al ₂ (SO ₄) ₃ ×18H ₂ O	0,0945

Vrijednost troška je izračunata na temelju cijene upotrijebljenih koagulanata/flokulanata (Tablica 3) čemu je pribrojen i trošak električne energije utrošene na miješanje. Cijena električne energije preuzeta je sa stranica HEP-a prema srednjoj vrijednosti skupe i jeftine struje (HEP 2015).

Iz rezultata ekonomske analize prikazanih Tablicom 7 je vidljivo da se za uklanjanje onečišćenja iz modelne otpadne vode kao isplativiji proces pokazala koagulacija/flokulacija s aluminijevim(III) sulfatom s obzirom na dobivenu nižu vrijednost omjera troška i postotka uklonjenog onečišćivala u iznosu od 0,0945 kn/%. Veća isplativost procesa s aluminijevim(III) sulfatom može se pripisati nižoj cijeni koagulantna u odnosu na cijenu željezovog(III) klorida (Tablica 3).

9. ZAKLJUČAK

U okviru ovog rada istraživana je učinkovitost procesa koagulacije/flokulacije za uklanjanje onečišćenja iz modelne otpadne vode koja je sadržavala otpadni toner koji se koristi u laserskim pisačima. Provedena je optimizacija parametara procesa koagulacije/flokulacije tj. određena je vrsta koagulant, njegova koncentracija i pH sustava kod kojih se postiže maksimalni stupanj uklanjanja zamućenja i ukupne organske tvari. Kao optimalni koagulant za obradu modelne otpadne vode odabran je aluminijev(III) sulfat u koncentraciji od 0,011 mol/L i pH=4. Naime, oba ispitivana koagulant su se pokazala učinkovitim za uklanjanje zamućenja modelne otpadne vode (preko 90 %). No upotrebom aluminijevog(III) sulfata uklonjeno je 77 % ukupnog organskog ugljika, dok je istovremeno, primjenom maksimalne ispitivane koncentracije željezovog(III) klorida (0,044 mol/L), uklonjeno oko 62 % ukupnog organskog ugljika. Također, i provedena ekonomska analiza ide u prilog upotrebi aluminijevog(III) sulfata kao koagulant uz postignutu isplativost procesa u iznosu od 0,0945 kn/%.

10. ZAHVALA

Zahvaljujemo djelatnicima Laboratorija za Geokemiju okoliša, Geotehničkog fakulteta, posebno voditeljici Laboratorija, izv. prof. dr. sc. Sanji Kapelj, doc. dr. sc. Aniti Ptiček Siročić te Saši Zavrtniku na ustupanju laboratorijskog vremena i prostora, instrumenata i izvođenju analiza. Također, zahvaljujemo Geotehničkom fakultetu, Sveučilišta u Zagrebu na financijskoj potpori. Zahvaljujemo dr. sc. Ivani Grčić, znanstvenoj suradnici sa Zavoda za polimerno inženjerstvo i organsku kemijsku tehnologiju, Fakulteta kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu na doniranom uzorku tonera.

11. LITERATURA

- Aboulhassan, M. A., Souabi, S., Yaacoubi, A., Baudu, M. (2014): Treatment of paint manufacturing wastewater by the combination of chemical and biological processes, *International Journal of Science, Environment and Technology*, 3, 5: 1747-1758
- Dimples, The environmental impact of ink, Dostupno: <http://getdimples.com/the-environmental-impact-of-ink/> (10.07.2015.)
- Faust, S. D., Aly, O. M. (1999): *Chemistry of Water Treatment*, Lewis Publishers, 2nd edn. Washington D.C.
- Fendri, I., Khannous, L., Timoumi, A., Gharsallah, N., Gdoura, R. (2013): Optimization of coagulation-flocculation process for printing ink industrial wastewater treatment using response surface methodology, *African Journal of Biotechnology*, 12, 30: 4819-4826
- Gudelj, I., Hrenović, J., Landeka Dragičević, T., Delaš, F., Šoljan, V., Gudelj, H (2011): Azo boje, njihov utjecaj na okoliš i potencijal biotehnoške strategije za njihovu biorazgradnju i detoksifikaciju, *Arhiv za higijenu rada i toksikologiju*, 62, 1: 91-100
- HEP Operater distribucijskog sustava d.o.o. Tarifni modeli, Dostupno: <http://www.hep.hr/ods/kupci/tarifni.aspx> (05.06.2015.)
- Kolorjet Chemicals Pvt. Ltd., Dostupno: <http://www.dyes-pigments.com/types-of-pigments.html> (20.06.2015.)
- Ramalho, P. A., Scholze, H., Cardoso, M. H., Ramalho, M. T., Oliveira-Campos, A. M. (2002): Improved conditions for the aerobic reductive decolourisation of azo dyes by *Candida zeylanoides*, *Enzyme and Microbial Technology*, 31, 6: 848-854
- Renault, F., Sancey, B., Badot, P-M., Crini, G. (2009): Chitosan for coagulation/flocculation processes—An eco-friendly approach, *European Polymer Journal*, 45, 5: 1337-1348
- Rubin, E. S., Davidson, C. I. (2001): *Introduction to Engineering and the Environment*, McGraw-Hill, International Edition, New York
- Sigma-Aldrich, Life Science and High Technology company, Dostupno: <http://www.sigmaaldrich.com/europe-export.html> (15.06.2015.)
- Tepeš, P. (2011): Laboratorijske vježbe iz Analitičke kemije okoliša (skripta), Geotehnički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Varaždin
- Vujević, D. (2007): Uklanjanje organskih tvari iz obojenih otpadnih voda primjenom naprednih oksidacijskih procesa, *Doktorska disertacija*, Zagreb, str. 1, 23-26
- Woodard, F. (2001): *Methods for Treating Wastewaters from Industry*, Butterworth-Heinmann, New Delhi, 219: 230-322